

## 볼엔드밀 가공에서 절삭속도 일정제어기법에 의한 커넥팅로드 가공기술

강명창\* · 정웅호\* · 김정석\*\* · 문성준\*\*\* · 김경균\*\*\*

(2001년 7월 18일 접수, 2002년 3월 20일 심사완료)

### The Machining Technique of Connecting Rod through Constant Control of Cutting Speed Method in Ball End Mill Machining

Myung-Chang Kang, Young-Ho Jung, Jeong-Suk Kim

Sung-Jun Moon and Kyung-Kyo Kim

**Key Words:** High Speed Machining(고속가공), Connecting Rod Die(커넥팅 로드), Constant Control of Cutting Speed(절삭속도 일정제어), Free Form Surface(자유곡면)

#### Abstract

The purpose of this study is to suggest how the machining technique of constant control of cutting speed can improve precision machining and tool life in high speed machining using a ball end mill. Cutting speed is changed in machining free form surfaces such as connecting rod die. So, we don't have supreme surface form and tool life on machining. To solve this problem we should settle on optimal cutting speeds in free form surface machining. And, to improve precision machining, We must execute high speed machining methods to output optimum NC data using developed constant control of cutting speed program after modeling by CAD/CAM. In this paper, a comparison was made of the cutting precision and tool life in conventional cutting and those in connecting rod machining applying the program developed.

#### 1. 서 론

현재의 고속가공기술은 고능률·고정도 가공을 실현한다는 측면에서 그 효용가치가 매우 높으며 현재 가장 연구가 활발히 진행되고 있는 가공기술중의 하나이다.<sup>(1~4)</sup> 특히 커넥팅 로드 금형과 같이 열처리된 고경도소재이면서 자유곡면형상은 대부분 CNC 고속머시닝센터에서 볼 엔드밀 가공에 의해 만들어진다.<sup>(5,6)</sup>

커넥팅 로드와 같은 3차원 자유곡면은 피삭재

의 경사진 각도와 볼 엔드밀의 접촉 부위에 따라 절삭특성의 변화가 심하게 일어난다. 그리고 같은 경사면에서도 공구경로에 따라 공구에 작용하는 절삭작용점의 변화로 가공면에 커스프(Cusp)가 다르게 생성되어 표면형상도 서로 다르다. 또한 공구의 기하학적 형상특징으로 동일한 주축회전수에서도 절삭속도가 변화한다. 이러한 절삭속도의 변화는 공구의 수명단축 및 제품의 가공정밀도에 많은 영향을 미친다.<sup>(7,8)</sup>

그러므로 볼 엔드밀을 이용한 자유곡면의 고속가공에서 공구수명 향상 및 고품위 가공을 실현하기 위한 가공기술개발이 절실히 필요하다.<sup>(9,10)</sup>

따라서 본 논문에서는 독창적으로 개발한 프로그램인 절삭속도 일정제어(Constant Control of Cutting Speed, CCCS)기법으로 열간 금형재(STD61)인 고경도(HRC52) 커넥팅 로드금형의 고속가공에서 공구처짐, 공구마멸, 칩 형상 등의 절

\* 부산대학교 기계공학부, ERC/NSDM

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부, ERC/NSDM

\*\*\* 부산대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : kangmc@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2361 FAX : (051)518-7207

삭특성을 살펴보고자 한다.

## 2. 절삭속도 일정제어 메커니즘

### 2.1 절삭속도 일정제어의 이론적 배경

Schulz는 절삭 과정 중 생성되는 두 개의 절삭인선의 모든 점들은 절삭인선 각에 따라 서로 다른 절삭부하를 견뎌야 하며, 공작물의 기울기와 상관없이 칩 생성은 항상 구형상의 선단부위에서 일어난다고 하였다.

볼 엔드밀링에서는 공작물의 기울기가 작을수록 절삭작용점이 공구선단부위에서 발생하므로 공구인선을 따라 절삭속도는 더 큰 구배가 일어나며, 절삭인선의 중심에서 절삭속도가 가장 느린다. 그래서 공구 선단부위의 끓개짐과 마찰의 발생이 이 지점에서 결정된다. 이러한 것은 보통 공작물의 가공 정밀도를 떨어뜨리고 공구의 수명을 감소시키는 결과를 가져온다. 그리고 상위 절삭인선의 점들에서는 절삭인선의 열역학적 부하가 공구의 기울기가 커짐에 따라 증가하지만, 반면에 절삭속도의 좀 더 균일한 분포가 이루어져 최적 절삭조건에 가까워진다.

그리고 볼 엔드밀 공구는 실제 공구 유효직경에 따라 동일한 주축회전수에서도 절삭속도가 변화하게 된다. 절삭속도가 변화하게 되면 공구와 공작물의 상대운동 차이에 의해 공구수명 및 가공정밀도가 저하된다. 볼 엔드밀 가공에서 공구와 공작물 기울기 변화에 따른 실제 공구 유효직경을 구하는 방법을 Fig. 1에 나타내었다. 자동차 부품인 커넥팅 로드 금형과 같은 자유곡면에서 식 (13)와 같이 절삭속도를 일정제어하기 위해서는 실제 공구 유효직경(D)을 구하여 공구 유효직경에 따라서 주축회전수(N)를 변화시키는 것이 필요하다.

아래의 식 (1),(6)을 기초로 하여 식 (7),(12)을 유도할 수 있었고, 최적의 절삭속도를 구할 수 있는 식 (13)을 도출할 수 있었다.

$$\beta_{FN} = 90 - \alpha \quad (1)$$

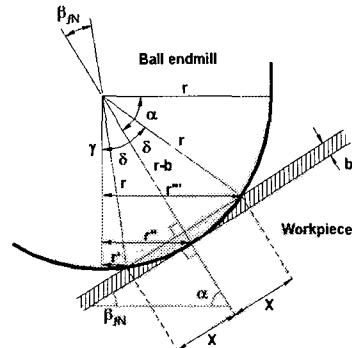
$$\tan \delta = \frac{X}{r-b} \quad (2)$$

$$\gamma + \delta = \beta_{FN} \quad (3)$$

$$\alpha + \gamma + \delta = 90 \quad (4)$$

$$\sin \delta = \frac{X}{r} \quad (5)$$

$$X^2 = r^2 - (r-b)^2 \quad (6)$$



$\beta_{FN}$  : tilt angle

$b$  : normal depth of cut

$r'$  : axial maximum effective radial

$r'''$  : axial minimum effective radial

Fig. 1 Effective diameters of ball end mill according to tilt angle

식 (7)을 기초로 해서 식 (2),(3),(6)을 이용하여 최대 공구유효반경인 식 (8)을 나타낼 수 있다.

$$r' = rs \sin \gamma \quad (7)$$

$$r' = r \sin \left[ \beta_{FN} - \tan^{-1} \sqrt{\left( \frac{r}{r-b} \right)^2 - 1} \right] \quad (8)$$

그리고 식 (9)는 식 (3)을 근거로 하여 공구의 중심 절삭점인 식 (10)을 찾을 수 있다.

$$r'' = rs \sin [\gamma + \delta] \quad (9)$$

$$r''' = rs \sin \beta_{FN} \quad (10)$$

공구의 최소 공구유효반경인 식 (12)는 식 (11)에서 유도 할 수 있다.

$$r''' = rs \sin [\gamma + 2\delta] \quad (11)$$

$$r''' = r \sin \left[ \beta_{FN} + \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{r^2 - (r-b)^2}}{r} \right) \right] \quad (12)$$

최종적으로 위의 공구의 유효반경 값인 식 (8),(10),(12)을 공구 직경 값으로 변환하여 절삭속도 방정식인 식 (13)을 나타낼 수 있다.

여기서 공구와 피작재와의 절삭위치점의 변화에 따라 공구의 평균 유효직경 또한 변화하게 되어

자유곡면 형상의 피삭재에서 위치에 따라 절삭속도가 변화하게 된다. 절삭속도의 변화는 공구수명과 가공 정밀도에 많은 영향을 미치기 때문에 절삭속도를 일정하게 유지시킬 필요가 있다. 그러기 위해서 형상에 따라서 변화한 공구 유효직경에 따라 주축의 회전수를 가변시킨다.

$$V = \frac{\pi D N}{1000} \quad (13)$$

## 2.2 알고리듬 및 프로그램 구성

절삭속도 일정제어 기법의 알고리듬을 Fig. 2에 나타내었다. 기존의 CAD/CAM에서 생성된 원시 NC 코드를 역 후처리(Reverse Post Process) 과정을 통하여 가공할 영역을 선정한 뒤 프로그램의 Z-map 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 실시한다. 그리하여 공구의 절삭영역을 구한 뒤 실제 공구 유효직경을 계산하고, 실제 공구 유효직경에 따라 주축회전수를 가변 시키는 NC 코드로 수정한다. 일반적으로 NC 코드 출력은 모델링 후 CL 데이터를 생성한 뒤 NC 코드를 산출하기 위해 후처리(Post Process) 과정을 거친다. 하지만, 절삭속도 일정제어를 하기 위해서는 그와 반대로 기존의 NC 코드에서 CL 데이터로 변환하여 공구 위치점을 찾는 과정이 필요하다. 이러한 과정을 역 후처리과정이라 한다.

위의 과정을 토대로 커넥팅 로드금형을 개발되어진 절삭속도 일정제어 프로그램을 통하여 시뮬레이션 한 것을 Fig. 3에 나타내었다. 이 프로그램에는 NC 데이터의 블록 처리상태를 실시간에서 감시 할 수 있는 기능과 공구의 직경, 공작물의 좌표, Z-map의 간격설정, 주축 회전수의 가변되는 상태, 권장 절삭속도뿐만 아니라 NC 데이터에서 시뮬레이션된 형상의 특정 구간을 볼 수 있도록 블록의 번호를 알 수 있다. 그리고 현재 가공중인 NC데이터를 볼 수 있는 창에서 임의의 블록을 지정하면, 화면창에서 작업자가 선택한 블록의 현재 가공위치를 파악할 수 있는 기능까지 설정하였다. CAD/CAM 소프트웨어인 유니그래픽스(Uni-Graphics)에서 원초적인 CL(Cutting Location)데이터를 산출한 뒤 절삭속도 일정제어 프로그램에서 공구의 직경, 공작물의 좌표, 권장 절삭속도등 위에서 언급한 옵션들을 설정한다. 그리고 프로그램을 구동시키면, 주축 회전수의 가변량에 따른 최적의 NC데이터가 산출된다.

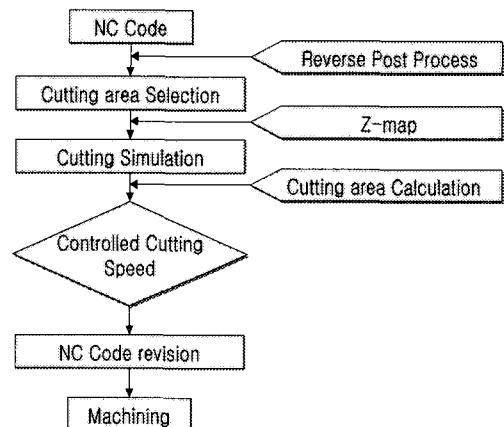


Fig. 2 Program algorithm of constant control of cutting speed

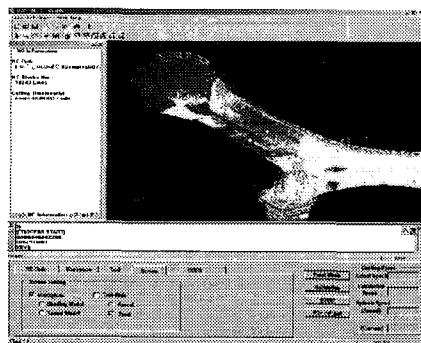


Fig. 3 Simulation program for constant control of cutting speed

절삭속도 일정제어 프로그램의 특징은 빠른 데이터 처리속도와 Open GL기능을 부가한 깨끗한 화면을 제공하고, 공작물의 확대와 축소를 할 수 있는 Zoom in, Zoom out기능과 작업자가 원하는 View Point를 전 방향에서 관찰할 수 있도록 설정하였다. 본 연구에서 개발한 이 프로그램은 사용자가 작업 환경과 조건에 알맞게 작업할 수 있도록 구성되어 있다.

## 2.3 실험 방법

본 실험에서는 유니그래픽스를 이용하여 커넥팅 로드 형상을 모델링 하고, CAM Tool에서 생성된 NC 데이터를 산출한 후 Fig. 3에서 보여준 프로그램을 실행시켜 최적화된 NC데이터를 산출한다. 그리고 절삭속도 일정제어를 한 커넥팅 로드 금형과 하지 않은 것과를 비교 실험하였다.

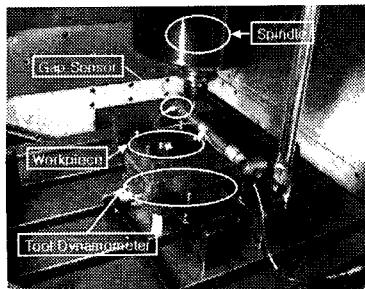


Fig. 4 Experimental setup for measuring cutting force and run-out

Table 1 Machining condition

	General Machining	CCCS
Workpiece	STD61(HRc52)	
Spindle revolution(rpm)	12,000	6,000~12,000
Feed rate(mm/min)	1,500	1,500
Depth of cut(mm)	0.15	0.15
Pick feed(mm/min)	0.3	0.3
Feed per tooth(mm)	0.06	Variable
Tool(OSG, Coating TiAlN)	φ 10(Rough), 2 teeth φ 6(Finish), 2 teeth	

공작기계는 최대 20,000rpm 까지 회전속도가 가능한 수직형 고속가공기(MAKINO V55)를 사용하였고, 실험조건은 Table 1과 같다. 여기서 날당 이송량은 가변되는 회전수에 따라서 변화되는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 본 실험의 실험 장치도를 보듯이, 공구 동력계(Kistler 9257B)와 비접촉식 갭 센서를 공구에 부착하여 획득한 절삭력과 공구의 런아웃(Run-out)은 전체형상에 따른 신호를 획득하기 위해 디지털 레코드로 통해 획득하였고, 신호의 획득은 절삭속도 일정제어기법을 도입한 한 것과 하지 않은 피삭재에서 같은 절삭 구간을 파악하여 실험하였다. 그리고 공구마멸과 칩 형상은 CCD 카메라를 사용하여 측정하였고, 표면형상은 디지털 카메라를 사용하여 비교 촬영하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 절삭력 파형과 공구처짐 비교 특성

공구와 피삭재와의 가공특성을 파악하기 위해

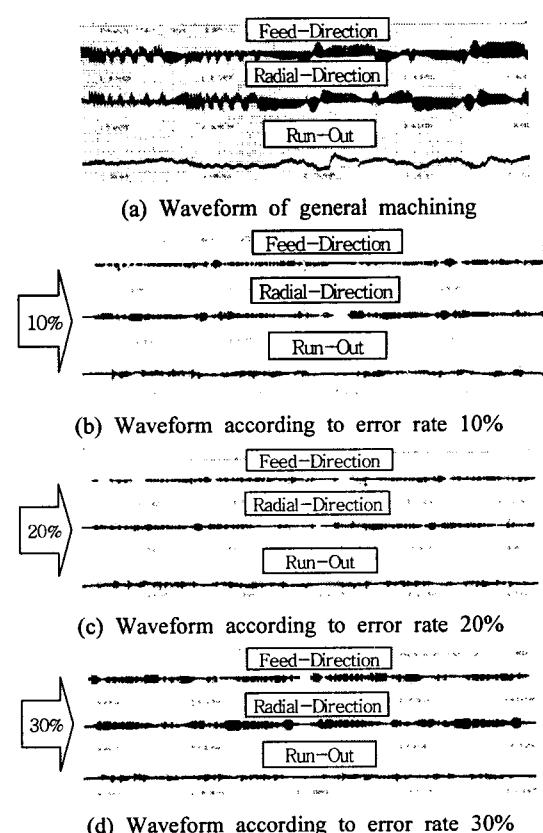


Fig. 5 Waveform of cutting force and run-out

서는 절삭력은 아주 중요한 측정 인자이다. Fig. 5은 일반적인 가공법으로 가공한 것과 절삭속도 일정제어 기법으로 황삭과 정삭 과정을 거친 절삭력 파형을 부분적으로 나타내었다. 그리고 절삭속도 일정제어를 한 것은 주축 회전수의 오차율을 각각 주었다. 여기서 오차율이란 절삭속도 일정제어의 권장 주축회전수에서 10~30% 정도의 가변 범위량을 주는 것을 말한다. 즉 공구(Ball End Mill)와 피삭재와의 가공 위치점의 변화로 자유곡면 형상에서의 가공시 피삭재의 부위에 따라서 절삭속도가 변화하게 되는데, 일정한 절삭속도를 유지하기 위해 자유곡면 가공시 공구와 피삭재와의 가공 위치점에 대하여 주축회전수를 가변 시킨다. 이때 NC 데이터의 총량에 대해 가변되는 주축회전수의 변화량을 오차율이라 한다.

오차율을 적당한 크기만큼 주는 이유는 오차율이 너무 크면 NC 데이터의 주축 회전코드 부분

이 컴퓨터가 처리하는데 너무 오래 걸릴 정도로 데이터 량이 많아지고, 오차율을 너무 작으면 주축 회전수의 가변량이 너무 작기 때문에 우수한 표면형상을 얻을 수가 없기 때문이다.

Fig. 5에 일반적인 가공법(a)으로 가공한 것과 절삭속도 일정제어 기법(b, c, d)으로 가공해서 획득한 절삭력 과형과 린아웃 과형을 나타내었다. 그리고 절삭속도 일정제어 한 것에서는 오차율을 각각 10~30%정도를 주어 그 과형을 비교하였다. 그 결과, 일반적인 가공법(a)에서는 큰 절삭력이 걸려 과형의 진폭이 절삭속도 일정제어를 한 것 보다 거의 두배정도 높았고, 린아웃 과형도 일정하지 않고 크게 나타났다. 그리고 절삭속도 일정제어를 한 것에서는 오차율을 10~30%를 준 것 모두가 일반적인 가공법보다 안정적인 경향이 나타났고, 그 중에서 오차율을 20%주었을 때가 가장 우수한 경향이 나타났다. 이를 볼 때 일반적인 가공법보다 절삭속도 일정제어 기법으로 가공한 것이 더 우수한 경향이 나타난 것을 알 수 있고, 절삭속도 일정제어를 한 것 중에서도 오차율을 20%주었을 때가 가장 좋은 경향이 나타난 것을 알 수 있다. Fig. 5에서는 커넥팅 로드의 전체 형상을 가공할 때의 신호를 획득하였다. 왜냐하면, 커넥팅 로드형상은 자유곡면이 복합적으로 형성되어 있기 때문에 부분적인 신호를 획득하는 것보다는 전체형상에 대해 신호를 획득하는 것이 가공성을 파악하는데 유리하기 때문이다.

### 3.2 표면형상 및 공구수명 비교 특성

커넥팅 로드금형의 가공시 일반적인 가공법에서는 금형의 표면 부위에 공구가 지나간 흔적이 남겨져 있는 것을 알 수 있지만, 절삭속도 일정제어 기법으로 가공한 면을 보면 깨끗한 표면 형상을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 5에서 보듯이 절삭력 뿐만 아니라 공구의 린아웃 현상이 규칙적이면서도 일정한 패턴으로 나온 결과인 것으로 알 수 있다.

Fig. 5과 비교해서 표면형상 또한 비례하게 나타났다. Fig. 6에서 (a)는 일반적인 가공법으로 가공해서 얻은 표면형상 사진 그림이다. (a)에서는 곡면부위에서 많은 공구가 지나간 흔적이 남은 것을 알 수 있다. 하지만, 절삭속도 일정제어를 한 표면형상 사진 그림을 보면 아주 깨끗한 표면 형상을 얻은 것을 알 수 있다.

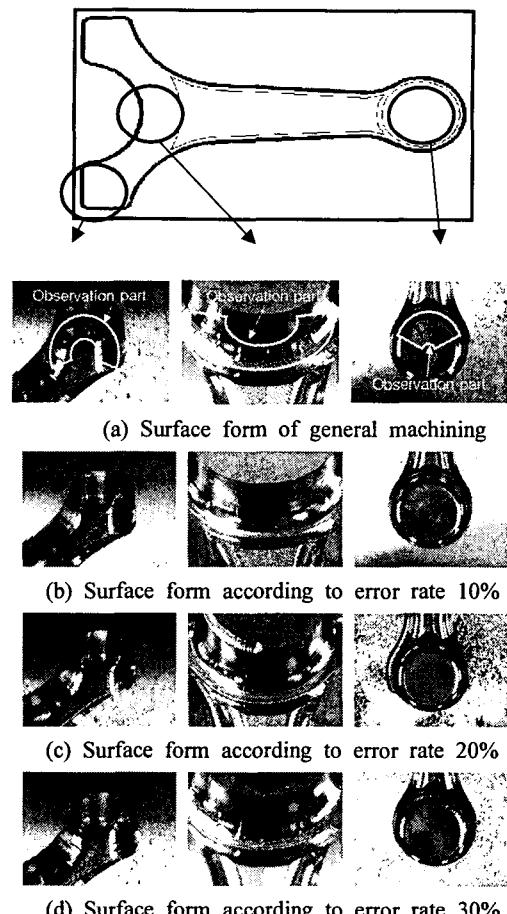


Fig. 6 Comparison of surface form

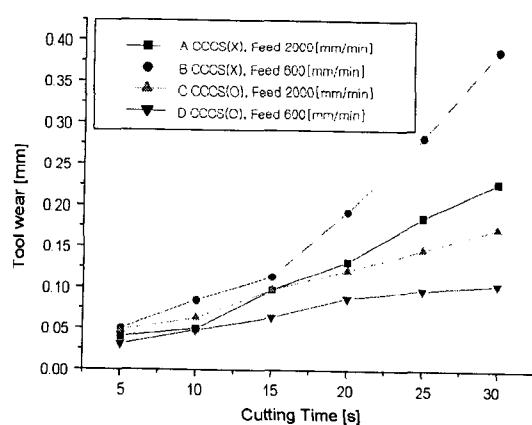
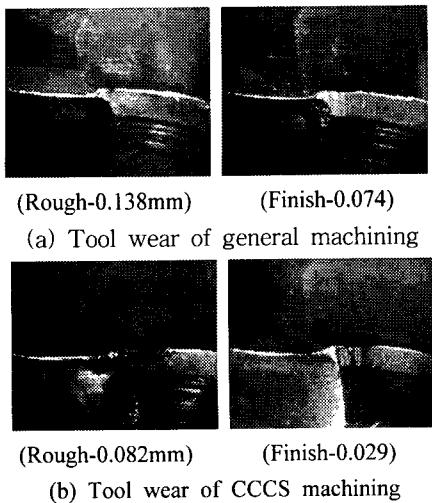


Fig. 7 Tool wear according to cutting time

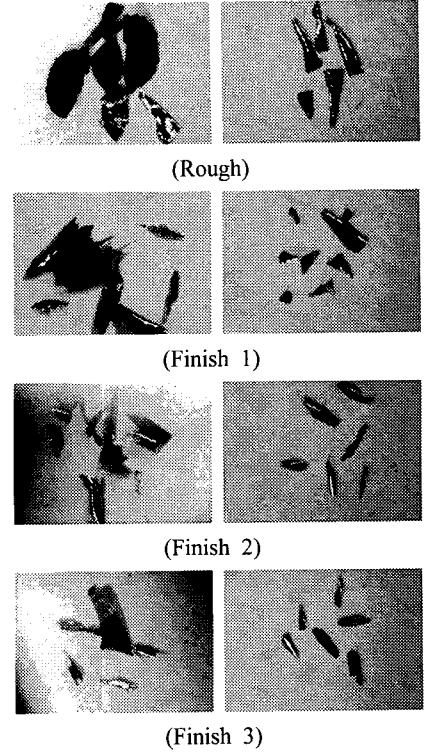


**Fig. 8** Comparison of tool wear

Fig. 5와 비교해서 표면형상 또한 비례하게 나타났다. Fig. 6에서 (a)는 일반적인 가공법으로 가공해서 얻은 표면형상 사진 그림이다. (a)에서는 곡면부위에서 많은 공구가 지나간 흔적이 남은 것을 알 수 있다. 하지만, 절삭속도 일정제어를 한 표면형상 사진 그림을 보면 아주 깨끗한 표면형상을 얻은 것을 알 수 있다. 절삭력 파형과 마찬가지로 오차율을 20% 주었을 때가 표면에 공구가 지나간 흔적이 없이 가장 깨끗한 표면형상을 얻었고, 오차율을 30% 주었을 때는 주축회전수의 가변량이 너무 많아 가공시간이 1.5배정도 오래 걸렸다. 그리고 너무 잣은 주축회전의 변화에 따라서 절삭속도 일정제어를 한 것 중에서는 가장 나쁜 표면형상을 볼 수 있다.

Fig. 7에는 커넥팅 로드형상의 1회 공정(pass)시 걸리는 30초의 절삭시간에 대비하여 각기 다른 이송량에 따라서 고속이송과 저속이송시 나타나는 공구마멸량을 절삭속도 일정제어기법과 종래 가공법으로 가공하여 비교하였다. 그 결과 고속 이송과 저속이송 모두 절삭속도 일정제어기법으로 가공한 경우 모두 공구수명 측면에서 우수한 경향인 것을 볼 수 있었다. 그리고 종래가공법으로 가공한 경우는 가공시간 15초 기준으로 공구의 마멸정도가 급격하게 증가하는데 반면, 절삭 속도 일정제어기법으로 가공한 공구의 마멸량은 아주 적은 마멸량을 보였다.

Fig. 8에서는 커넥팅 로드형상의 1회 공정(pass)



(a) General machining (b) CCCS machining

**Fig. 9** Comparison of chip form

가공했을 때의 결과를 기초로 한 Fig. 7의 결과를 토대로 커넥팅 로드 형상의 전체를 황삭가공과 정삭가공 함으로서 공구의 마멸량을 비교하였다.

그 결과, 황삭가공과 정삭가공 모두 종래 가공법보다 절삭속도 일정제어기법으로 가공한 공구 마멸량이 현저히 적은 것을 알 수 있다. 특히 종래 가공법으로 가공한 공구를 관찰한 결과 공구의 선단부위에 침핑이 발생한 흔적을 찾을 수 있었거나 절삭속도 일정제어기법으로 가공한 공구는 모두 소량의 마멸만 발생했을 뿐 침핑은 발생하지 않았다. 그리고, 마멸량을 비교했을 때, 절삭 속도 일정제어 기법으로 가공한 공구가 3회의 재실험으로 통해 황삭 공정에서는 30%, 정삭 가공에서는 약 40~45% 정도의 수명이 향상된 것을 알 수 있다.

### 3.3 칩 형상 특성

칩 형상의 패턴을 알아보는 것은 고속가공에서

는 아주 중요한 인자이다.

여기서 절삭침의 획득은 국부적인 부분보다 전체형상에서 절삭가공한 칩을 획득하여 본 실험조건에서의 가공성을 관찰하고자 한다. 공구와 피삭재와의 절삭 위치점이 자유곡면의 형상에 따라서 모두 다르게 나타난다. 다음의 실험결과는 6φ Ball End Mill로 가공하여 배출된 칩을 관찰하였으며, 공구의 유효직경은  $0 < \text{유효직경} < 6$ 이다.

Fig. 9에서 보듯이 일반적인 절삭가공에서는 일정하지 않은 절삭속도로 인해 칩의 배출이 원활하게 배출되지 않아 연속적이고, 일정하지 않은 절삭온도로 인해 다양한 색깔의 칩이 생성된 것을 알 수 있다. 그러나 절삭속도 일정제어 기법으로 가공해서 배출된 칩을 보면 칩의 원활한 배출로 인해 단속적이고, 칩의 색깔 또한 일정한 절삭온도에 의해 거의 피삭재와 같은 색깔인 것을 알 수 있다. 단지 절삭횟수가 많아질수록 공구마멸에 의해 칩의 모양이 일그러진 모양을 볼 수 있다. 실험의 신뢰성을 얻고자 횡삭공정은 1회, 정삭공정은 3회로 하였다. 칩의 모양이나 색깔을 비교해 보면 절삭속도 일정제어 기법으로 가공해서 배출된 칩이 안정적이다.

#### 4. 결 론

절삭속도 일정제어 기법으로 열간 금형재인 고경도 커넥팅 로드금형을 가공함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭속도 일정제어 프로그램을 개발하여 최적의 NC 데이터를 획득할 수 있었다.
- (2) 절삭속도 일정제어 기법으로 가공한 것이 절삭력과 린아웃이 더 안정적이고, 표면형상뿐만 아니라 공구수명도 30~45%정도 향상되었다.
- (3) 일정한 절삭력과 린아웃으로 인해 칩의 형태와 색깔이 더 안정적인 경향으로 나타났고, 칩의 비산능력은 절삭속도 일정제어 기법으로 가공한 것이 더 우수하다.
- (4) 주축회전수의 가변 범위량인 오차율을 20% 주었을 때가 가장 안정적이다.

#### 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단 우수

연구센터 지원금 및 기계공학부 장학지원금에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

- (1) Tlusty J. and Smith, S. 1997, "Current Trends in High-Speed Machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME*, Vol. 119, pp. 664~666.
- (2) Shut, H., 1995, "High Speed Machining of Dies and Moulds-Cutting Condition and Technology," *CIRP*, Vol.44.
- (3) Ikeda, T., 1995, "高速・高精度切削をために工作機械と粗加工技術," 形技術セミナ.
- (4) Smith, S. and Tlusty, J., 1997, "Current Trends in High Speed Machining," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 119, pp. 664~666.
- (5) Tae Jo Ko and Hee Sool Kim, 1999, "Mechanistic Cutting Force Model in Band Sawing," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 39, pp. 1185~1197.
- (6) 1998, '98 NC 공작기계 기술세미나', 한국기계 연구원.
- (7) Lee, P. and Altintas, Y., 1996, "Prediction of Ball End Milling Force from Orthogonal Cutting data," *Journal of MTM*, Vol. 36, No. 9, pp. 1059~1072
- (8) Seo Tae Il, 1999, "Tool Trajectory Generation Base on Tool Deflection in the Flat-End Milling Process," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 12, pp. 918~930.
- (9) Feng, H. Y. and Menq, C. H., 1996, "A Flexible Ball End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118 pp. 461~469.
- (10) Liu, C. R. and Barash, M. M., 1976, "The Mechanical State of the Sublayer of a Surface Generated by Chip-Removal Process," Part 2; *Cutting with a Tool With Flank Wear. Journal of Engineering for Industry*, pp. 203~1208.